

УДК 621.311.25:621.039.255:66-967.001.6

Г. А. ЛЕЩИНСКИЙ, канд. техн. наук, С. В. САВЕЛЬЕВ  
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

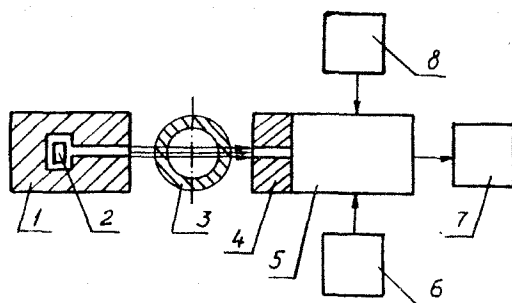
## **ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ПАРСОДЕРЖАНИЯ В ТРУБОПРОВОДАХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Описывается прибор для определения соотношения между жидкой и паровой составляющими двухфазных сред в трубопроводах и теплообменниках, основанный на действии проникающего гамма-излучения. Целью измерений этим прибором является снижение вибрации и тепловых потерь.

Эксплуатационная надежность оборудования электростанций в значительной мере зависит от вибрационного состояния трубопроводных систем, транспортирующих пароводяную среду в нестационарном режиме ее течения. Длительное воздействие сильных вибраций, которым подвержены такие трубопроводы, приводит к разрушению теплоизоляции, обрыву креплений и самих трубопроводов, образованию свищей. Оно является причиной аварийных ситуаций вплоть до отключения энергоблоков при разгерметизации первого и второго контура АЭС и повышения уровня радиационного фона в реакторных и турбинных цехах.

Переход среды, находящейся в режиме насыщения, в двухфазное состояние (вскипание) сопровождается возникновением нестационарных гидродинамических сил, вызывающих вибрацию [1]. Создание бесконтактного прибора, обнаруживающего место вскипания и измеряющего объем паровой фазы, позволило разработать конструктивные и режимные рекомендации по улучшению вибрационного состояния трубопроводов. Кроме того, информацию о паросодержании в условиях эксплуатации, включенную в методику гидродинамических расчетов, можно использовать для принятия превентивных противовибрационных мер на стадии проектирования.

Необходимость создания мобильной установки для неразрушающего (бесконтактного) контроля паросодержания в толстостенных трубопроводах обусловила выбор метода измерения, основанного на просвечивании трубопроводов коллимированным пучком жесткого гамма-излучения. Эксплуатационным измерениям предшествовала серия лабораторных и методических экспериментов с гамма-установкой, изготовленной по схеме, приведенной на рисунке.



Блок-схема прибора:

- 1 – защитный контейнер; 2 – источник гамма-излучения; 3 – трубопровод с двухфазной средой; 4 – коллиматор; 5 – блок детектора; 6 – блок питания низкого напряжения; 7 – пересчетный прибор; 8 – блок питания высокого напряжения.

Источник жесткого гамма-излучения (ампула с цезием-137 активностью 0,1 мГ-экв. радия), помещенный в защитный свинцовый контейнер с коллимирующим каналом, просвечивал трубу, частично заполненную водой. Ослабленные гамма-лучи через приемный коллиматор попадали на сцинтиллятор (монокристалл йодистого натрия, активированный теллуром, NaI(Tl), который использовался для преобразования энергии ионизирующего излучения в световые вспышки (сцинтилляции). Последние преобразовывались в электрические сигналы и усиливались фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Для согласования высокоомного выхода ФЭУ с низкоомным входом пересчетного прибора служил эмиттерный повторитель. Блоки питания высокого и низкого напряжения предназначались для ФЭУ и эмиттерного повторителя соответственно. Коллиматор, монокристалл, ФЭУ, эмиттерный повторитель конструктивно объединены в блок детектора, заключенный в светонепроницаемый алюминиевый корпус и свинцовую оболочку для защиты от радиационных помех.

С помощью многоканального амплитудного анализатора импульсов подобран фиксированный уровень первичной амплитудной дискриминации и путем варьирования тремя параметрами: напряжения питания детектора, настройки порогового устройства пересчетного прибора, расстояния до блока детектора.

Измерения выполняли с фиксированным объемом воды, различным образом распределенным по отсекам внутри трубы. Их результаты свидетельствуют об однозначной зависимости полученного счета импульсов от объемного соотношения воды и воздуха, имитирующего паросодержание в реальных трубопроводах с двухфазной средой. Вза-

имное расположение воды и воздуха при их неизменном объемном соотношении на счет не влияло.

По результатам лабораторных опытов спроектирована и изготовлена гамма-установка для эксплуатационных измерений, состоящая из механической части, электронной части и гамма-источника цезий-137 активностью 250 мГ-экв. радия в стандартном защитном контейнере. Механическая часть включает разъемный хомут, который с помощью прижимов неподвижно закреплен на трубе с исследуемой средой. На подвижном элементе механической части, снабженном регулировочным винтом, установлен контейнер и блок детектора. При вращении винта ось коллимирующих отверстий пересекает трубу, при этом пучок гамма-лучей просвечивает среду в трубе. Положение пучка относительно трубы определяется по специальной шкале, связанной с детектором. Предусмотрено принудительное охлаждение блока детектора, что обеспечивает независимость от внешних условий его теплового режима.

Декадный пересчетный прибор суммирует сигналы в течение заданной экспозиции и представляет их в цифровом виде. Диаметр коллиматора равен 8 мм, напряжение питания ФЭУ – 1,9 кВ. Погрешность установки с учетом статистического разброса импульсов не превышает 1,8% при экспозиции 100 с.

При лабораторных испытаниях установки обнаружено, что паросодержание вдоль просвечиваемой хорды сечения трубы подчиняется зависимости

$$\varphi = \frac{1}{\mu_o \cdot x} \cdot \frac{\rho' - \rho''}{\rho_o} \ln \frac{n_\Phi}{n_T} + 1, \quad (1)$$

где  $x$  – длина просвечиваемого слоя среды;  $\mu_o$  – линейный коэффициент ослабления монохроматического пучка в холодной воде;  $n_\Phi$  – измеренный счет импульсов по исследуемой среде;  $n_T$  – измеренный счет импульсов по трубе с паром;  $\rho'$  – плотность воды в условиях эксперимента;  $\rho''$  – плотность пара в условиях эксперимента;  $\rho_o$  – плотность воды в нормальных условиях.

Табличное значение  $\mu_o$  для цезия-137 в каждом опыте уточняли при тарировке по заполненной водой трубе. Тогда при  $\varphi = 0$

$$\mu_o = - \frac{\rho_o}{\rho' - \rho''} \cdot \frac{1}{x} \ln \frac{n_\Phi}{n_T},$$

где  $n_B$  – измеренный счет импульсов по заполненной водой трубе.

При испытаниях установки на опытном стенде Нововоронежской АЭС, привязанном к схеме трубопроводов турбины К-220-44, воспроизводились режимы, аналогичные таковым в основных трубопроводах. Объемное паросодержание измеряли двумя способами: по средней величине, определяемой эпюрой паросодержаний, измеренных вдоль различных хорд сечения, и по величине ослабления пучка вдоль диаметра [2]. Обе величины практически совпадали, поэтому в дальнейшем режимы течения в рабочих трубопроводах второй очереди Нововоронежской АЭС исследовали просвечиванием по диаметру с определением локального паросодержания по формуле (1), где величину  $x$  принимали равной внутреннему диаметру трубы.

Для разделенного ламинарного течения в горизонтальных трубопроводах паросодержание  $\varphi_o$  можно выразить через локальное  $\varphi$ , измеренное вертикальным пучком:

$$\varphi_o = \frac{\frac{4\pi}{180} \arcsin \sqrt{\varphi} - \sin(4 \arcsin \sqrt{\varphi})}{2\pi}. \quad (2)$$

Формула (2) получена путем несложных преобразований при рассмотрении сечения трубы, частично заполненной водой.

Расчет параметров нестационарного адиабатного двухфазного потока основан на системе гидродинамических уравнений сохранения массы, энергии и количества движения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial G}{\partial z} &= 0; \\ \rho \frac{\partial i}{\partial \tau} + G \frac{\partial i}{\partial z} - r \frac{\partial \psi}{\partial \tau} &= 0; \\ \frac{\partial G}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial z} (G^2 \cdot V) &= - \left( \frac{\partial P}{\partial z} + H + \rho g \sin \theta \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $i = i'(1 - \chi) + i'' \cdot \chi$ ,  $\psi = \rho' \cdot \chi(1 - \varphi) + \rho'' \cdot \varphi(1 - \chi)$ ,

$$V = \frac{(1 - \chi)^2}{\rho'(1 - \varphi)} + \frac{\chi^2}{\rho'' \cdot \varphi}, \quad \chi = \frac{\rho' \cdot S \cdot \varphi}{1 - \varphi + \rho' \cdot S \cdot \varphi},$$

$\rho, G, i, P$  – плотность, массовая скорость, энтальпия, давление смеси;  
 $\tau$  – время;  $z$  – координата;  $H$  – гидравлические потери по длине трубы;  $\theta$  – угол наклона трубы;  $r$  – удельная теплота парообразования;

$\chi$  – массовое расходное паросодержание;  $\varphi$  – истинное объемное паросодержание;  $S$  – коэффициент скольжения фаз. Индексы ' и '' относятся к воде и пару соответственно.

При нестационарном течении условие термодинамического равновесия фаз не соблюдается, а описать неравновесное течение только уравнениями гидродинамики не удастся. Поэтому для замыкания системы (3) следует обратиться к кинетике образования пузырьков и получить соотношения для скорости парообразования, которые связывают паросодержание с другими параметрами потока:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\varphi \cdot \rho'') = \frac{8\pi \cdot \lambda \cdot \Delta T}{r \cdot f} N - \frac{\partial}{\partial z}(\varphi \cdot \rho'' \cdot w''); \quad (4)$$

$$\frac{\partial N_v}{\partial \tau} = \frac{n\Pi}{\tau_1 \cdot f} - \frac{\partial}{\partial z}(w'' \cdot N_v). \quad (5)$$

Здесь  $N = f \cdot N_v^{2/3}$  – число пузырьков в сечении трубопровода;  $N_v$  – объемная концентрация пузырьков;  $f$  – площадь поперечного сечения;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности пара;  $\Delta T$  – разность температур жидкости и насыщения (величина перегрева);  $w''$  – скорость пара;  $n$  – плотность центров парообразования;  $\tau_1$  – период образования пузырьков;  $\Pi$  – периметр канала.

Уравнения (3)–(5) с начальными, граничными условиями и соответствующими алгебраическими соотношениями, включающими полуэмпирические квазистационарные зависимости для коэффициентов гидравлического трения и скольжения фаз, образуют замкнутую систему, описывающую адиабатное двухфазное нестационарное неравновесное течение.

Систему решали численными методами на ЭВМ. Максимальное отклонение расчетных значений паросодержания от опытных данных не превышает 12%. Последние следует считать более представительными, так как математическая модель построена с неизбежными упрощениями реального процесса.

Прибор использован на Нововоронежской АЭС, Южно-Украинской АЭС, Криворожской ГРЭС, в том числе на объектах, особенно подверженных опасным вибрациям: дренажные трубопроводы регенеративных подогревателей высокого давления (ПВД) и паросепараторы острого пара. Разработанные по результатам выполненных измерений рекомендации позволили снизить вибрации в среднем в 5–7 раз.

Примером применения прибора для повышения экономичности теплообменных аппаратов могут служить измерения на системе внутритурбинных дренажей, а также на трубопроводах сброса конденсата греющего пара ПВД в деаэраторы, где фиксировалось количество так называемого “пролетного” пара. Результаты измерений положены в основу режимных мероприятий по снижению тепловых потерь.

Оптимизация теплообмена в регенеративных подогревателях и деаэраторах, а также предотвращение аварийных режимов трубопроводных коммуникаций способствуют снижению количества вредных выбросов электростанциями. Поэтому использование предлагаемого гамма-прибора на Змиевской ГРЭС Харьковской области может в некоторой мере улучшить экологическую обстановку в регионе.

1. Тонг Л. Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. – М.: Мир, 1969.

2. Дементьев Б.А., Скачек М.А. Определение среднего истинного паросодержания и эшор распределения паросодержания по сечению трубы // Труды МЭИ. Вып.81. – М.: МЭИ, 1971.

Получено 25.01.2000

© Лещинский Г.А., Савельев С.В., 2000

УДК 621.1.016

А.Ф.РЕДЬКО, д-р техн. наук, И.В.ГАЛУЦАК

*Харьковский государственный технический университет  
строительства и архитектуры*

В.Я.ГОРБАТЕНКО, А.А.ШЕВЕЛЕВ, кандидаты техн. наук

*Харьковский государственный политехнический университет*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ С ПРЕРЫВИСТЫМИ СТЕНКАМИ**

Предлагается математическая модель для численного определения теплогидравлических характеристик в разрезных плоскопараллельных каналах с коридорным и шахматным расположением пластин при ламинарном и турбулентном течении. Математическая модель сформирована уравнениями плоского пограничного слоя.

Повышение технико-экономических показателей теплообменников для систем отопления, вентиляции и использования тепловых ВЭР требует применения новых, интенсифицированных теплообменных поверхностей. Одной из них может быть поверхность из труб с сегментным оребрением [1]. Интенсификация теплообмена при таком оребрении достигается за счет периодического возобновления гидродинамического и теплового пограничных слоев (ПС) и уменьшения их толщины на каждом сегменте, а также турбулизации потока при срыве с острых кромок сегментов. Эти же факторы вызывают и увеличение